

Divide et impera –Teile und herrsche

Wie Zerlegung von komplizierten 3D- EM-Simulationsmodellen in kleinere Teilgebilde mit nachfolgender Zusammenschaltung oder Ausnutzung von geometrischer Periodizität zu einer drastischen Verkürzung der Simulationsdauer führt

Franz Hirtenfelder *)

Einleitung

Der Ausspruch "divide et impera" geht vielleicht bis auf Julius Caesar zurück und steht für das Prinzip, die eigenen Gegner, Besiegten, Vasallen oder Untertanen gegeneinander auszuspielen und ihre Uneinigkeit für eigene Zwecke, zum Beispiel für die Machtausübung zu verwenden.

Deutlich humaner ist dagegen die Auffassung, große Aufgaben und Probleme dadurch besser lösen zu können, indem sie in kleinere Teilprobleme zerlegt werden, die einfacher handhabbar sind als das große Problem. Die Lösungen der Teilprobleme werden anschließend zur Gesamtlösung des großen Problems verwendet.

Die Ausgangssituation

Entwicklungsgeschwindigkeit und "Time to Market" sind heute Schlüsselwörter, die über Erfolg oder Misserfolg entscheiden. Innovation und Wettbewerbsvorteil können verloren gehen, wenn neue Ideen und Produkte stecken bleiben in einer endlosen Schleife von Iterationen, Prototypenbau und Messungen bevor schließlich ein marktfähiges Produkt entsteht.

In vielen Disziplinen ist die 3D- Feldsimulation kaum mehr wegzudenken, unterstützt oder ersetzt den Prototypenbau vollständig.

Heute gibt es Simulationstools, die ein Stadium erreicht haben, wo die Realisierung des Prototypen auf Basis der Berechnungen kaum mehr von den Erwartungen abweicht. In vielerlei Hinsicht kann eine Simulation unbeschränkte Einsichten in die Zusammenhänge und Wirkungsweise – die letztlich über die einwandfreie Funktion des Bauteils entscheidet – eröffnen und informativer sein als ein schlichter Prototyp

Die zunehmende Komplexität der Bauteile jedoch zwingt trotz immer schneller werdender Rechner zu einer Aufteilung in einzelne, kleinere Simulationsmodelle: Das Gesamtergebnis wird entweder durch einfache Zusammenschaltung der Streuparameterteile erfolgen – wie in der Schaltungssimulation üblich- oder auch durch Überlagerung von geeigneten Felddaten. Hier sollen die zwei ähnlichen Prinzipien an jeweils einem Beispiel demonstriert und deren Richtigkeit mit Messung verifiziert werden.

Die verwendeten Werkzeuge - eine Einführung

Den Herausforderungen und den Ansprüchen an die Simulationswerkzeuge stellt sich die Firma Computer Simulation Technology (CST) mit ihren Produkten CST MICROWAVE STUDIO® (CST MWS) und CST DESIGN STUDIO™ (CST DS). Basierend auf einer langen Software-Historie [1], entwickelt der sehr generelle, umfassende Ansatz seine volle Leistungsfähigkeit in einem weitem Einsatzgebiet, das von Statik bis in den Höchsthäufigkeitsbereich reicht.

CST MWS basiert auf der Finiten Integrationstechnik (FIT) [1], einem sehr allgemeinen Ansatz, der die bekannte FDTD Methode [2] als Spezialfall beinhaltet. FIT beschreibt die Maxwell'schen Gleichungen auf einem Knotennetzwerk (Gitter oder Mesh), unter Einhaltung von gewissen notwendigen Eigenschaften wie z.B. der Energieerhaltung. CST MWS bietet als erstes Simulationstool die Möglichkeit, sowohl die Methode – FIT kann im Zeit- als auch im Frequenzbereich formuliert werden – als auch den Gittertyp für die Berechnung auszuwählen: Kartesische (Hexaeder) und auch nicht-orthogonale Gitter (Tetraeder) werden unterstützt. Im Zeitbereich wird ein explizites Zeitbereichsintegrationsschema angewandt, welches sehr effektiv im kartesischen Gitter arbeitet. Um auch beliebige geformte und gekrümmte Strukturen in einem orthogonalen Gitter zu erfassen, wurde das Perfect Boundary Approximation (PBA)®-Verfahren [3] entwickelt. PBA erlaubt die Zerteilung einer Zelle in zwei Teile, wobei die exakte Schnittfläche der beiden Partner erfaßt wird. Daher kann z.B. die Dicke einer dünnen Metallisierung in einer einzigen großen Zelle dargestellt werden, ohne die Materialgrenze exakt zu vernetzen.

Die Thin Sheet Technology (TST)TM, eine Erweiterung der PBA, erlaubt die Behandlung von Zellen die durch dünne, möglicherweise verlustbehaftete, Metallflächen zerschnitten werden. Damit lassen sich dünnwandige Strukturen oder Gehäuse bzw. Abschirmungen mit minimalem Aufwand modellieren. Eine Weiterentwicklung der Meshstrategie stellt das Multilevel Subgridding Scheme (MSS)TM dar: damit lassen sich lokal begrenzte, unterschiedliche Gitterdichten definieren. Diese werden meist an feinen, komplexen Strukturen angebracht und bestehen aus in sich verschachtelten Untergittern. Von fundamentaler Bedeutung für die Simulationsgeschwindigkeit ist der Gittergenerator (Mesher), in den viel Entwicklungsaufwand gesteckt wird: dieser ist Expertensystem basierend und findet z.B. Metallkanten, verdichtet das Gitter lokal und behandelt dort die Feldsingularitäten in geeigneter Weise. Ebenso garantiert er die korrekte Meshdichte in Bezug auf die Wellenlänge unter Berücksichtigung der dielektrischen Verkürzungen. Lokale Meshparameter sind an Geometrieobjekte gebunden und passen sich geometrischen Veränderungen an, um z.B. parametrische Studien oder Optimierungen durchführen zu können.

CST MWS selbst ist vollständig in CST DS eingebettet. Das Prinzip von CST DS ist relativ einfach: Teilmodelle in Streuparameter-Beschreibung werden kombiniert, ähnlich einem Schaltungssimulator. Die Verknüpfung geschieht auf der Ebene von Wellenleiter- oder diskreten Toren, wobei diese auch mehrmodig sein können. CST DS bietet eine offene Entwicklungsumgebung welche die Kombination von Lösungen aus anderen EDA- Tools ermöglicht. Ziel ist, die verschiedensten „Best in Class“ Techniken unter einer Oberfläche zu vereinen. So ist z.B. auch ein Subset von APLAC® enthalten, speziell für den Einsatz von gekoppelter EM- und Schaltungssimulation.

CST MWS -Teilmodelle können in CST DS geladen und über ihre generalisierten S-Parameter kombiniert werden, wobei auch die Parameter des 3D EM-Modells benutzt werden können um Optimierungen hinsichtlich der Dimensionen oder Materialdaten durchzuführen.

Anwendungen aus der Praxis

Einfaches Koaxiales Tiefpassfilter:

Das erste, sehr einfache Beispiel (Abb.1) zeigt ein Tiefpaßfilter in koaxialer Ausführung mit dem entsprechenden CST MWS -Modell in Abb.2: Die koaxiale Hülle wird als zylindrische Metallberandung simuliert.

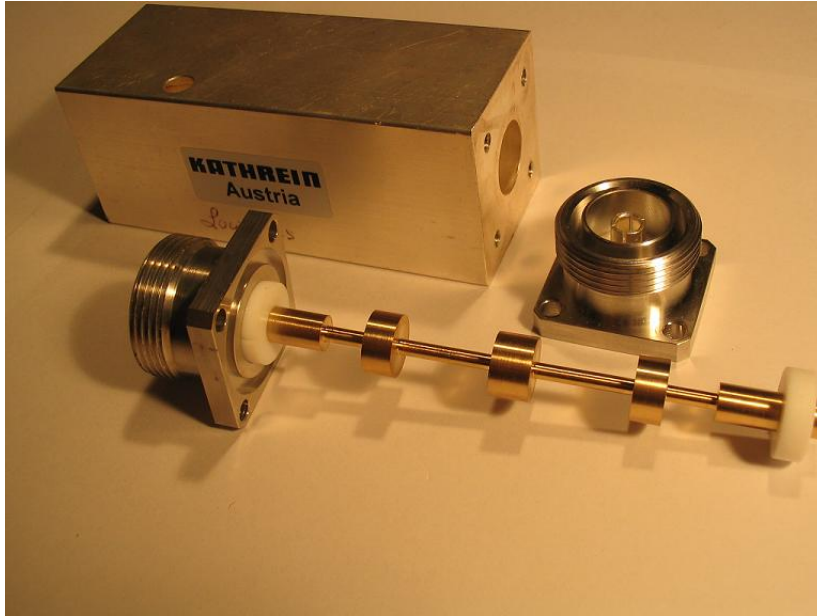


Abb.1: Der zerlegte Prototyp des dreistufigen Tiefpaßfilters

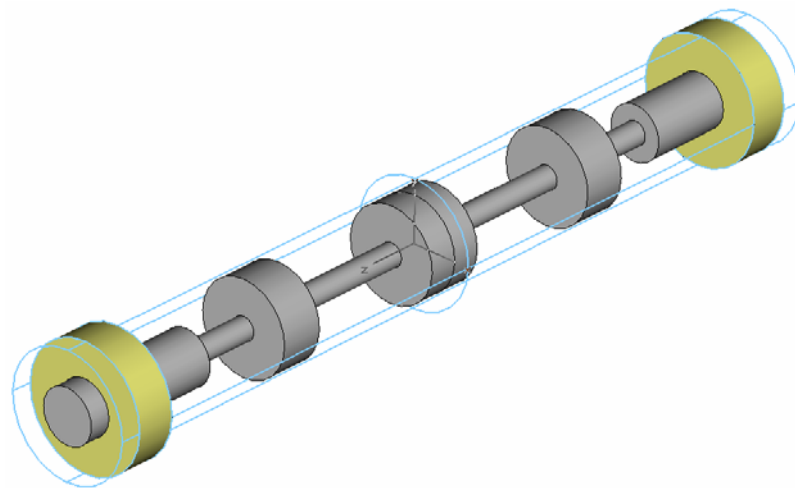


Abb. 2: Das CST MWS Modell.

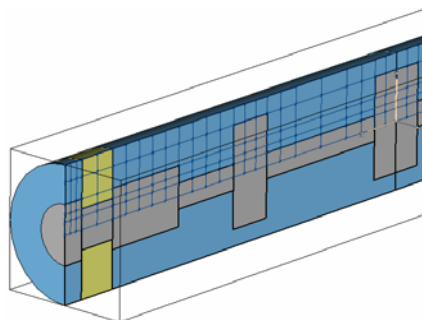


Abb. 3: Default Meshdichte mit 10 Gitterlinien/Wellenlänge

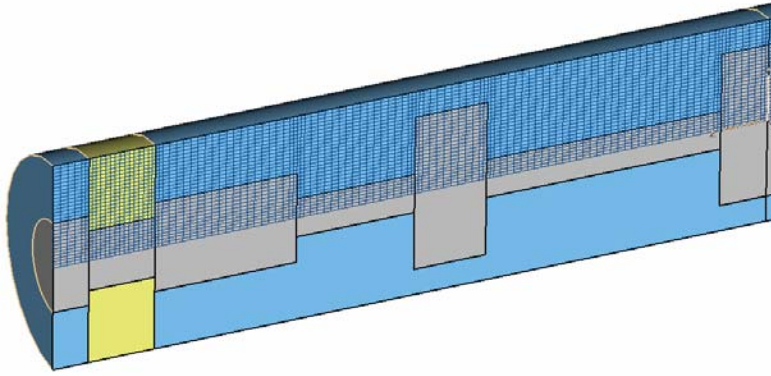


Abb. 4: Feinste Gitterauflösung mit 80 Gitterlinien/Wellenlänge

Der Geometrie wird ein kartesisches Gitter mit Standardeinstellungen, Abb. 3, überlagert. Um eine Aussage für die Genauigkeit der Ergebnisse zu erhalten, wird mit diesem Standardgitter die Rechnung durchgeführt und dann jeweils die Meshdichte verdoppelt. Abb. 4 zeigt den sich ergebende 8-fach verdichtete Gitter. Die Konvergenz der S-Parameter ist in Abb. 5 dargestellt: offensichtlich, führt eine Verfeinerung oberhalb von 40 Gitterlinien/Wellenlänge zu keiner weiteren Änderung in den Ergebnissen.

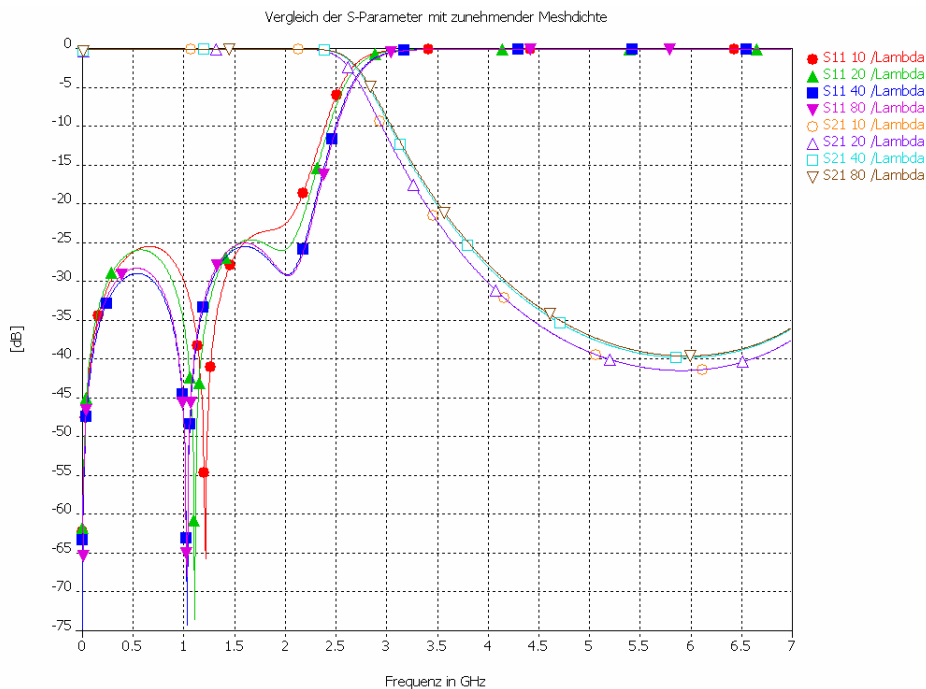


Abb. 5: Vergleich der S-Parameter für verschiedene Meshdichten

Die Rechenzeit lag zwischen 9 sec bei grobem und 12,5 min bei feinstem Gitter (PC Pentium Xeon, 2.66GHz).

Alternativ kann man auch eine automatisch laufende, adaptive Gitterverfeinerung durchführen: Ausgehend vom groben Gitter führt der Mesher abhängig vom Ort stärkster Feldenergie lokale Gitterverfeinerung durch. Dies geschieht natürlich effektiver als ein

homogen verdichtetem Gitter. Abb. 6 zeigt den Reflexionsparameter S_{11} in Abhängigkeit der Gitterverfeinerung.

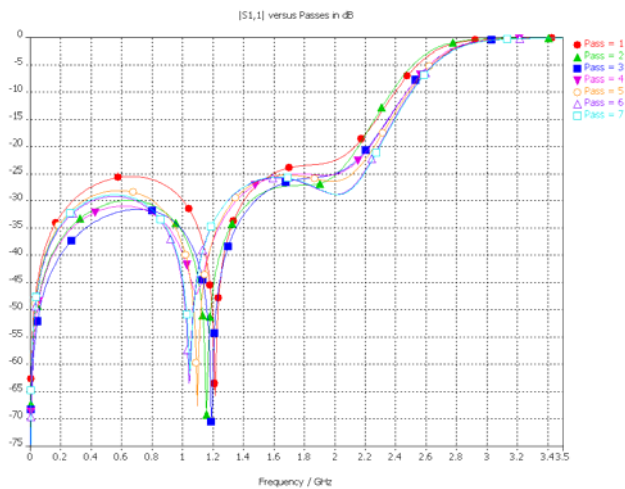


Abb. 6: Vergleich von S_{11} der einzelnen Verfeinerungsschritte

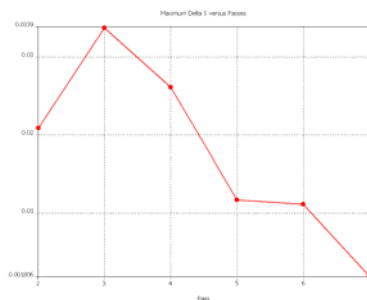


Abb. 7: Abnahme des rel. Fehlers der S -Parameter bei adaptivem Meshing

Nach 7 adaptiven Durchläufen ist die eingestellte Schranke von $\Delta S = 2\%$ unterschritten. Die Gitterdichte entspricht dann etwa der von 40 Linien/ λ des homogenen Gitters. Die Rechenzeit aller Durchläufe beträgt nur etwa 70% der Rechnung mit 80 Linien/ λ .

CST MWS in der neuen Version 5 bietet die Möglichkeit von lokalen Untergittern (Subgridding): Ändert man den Mesheinstellung entsprechend das Basisgitter so, daß es an den kritischen Punkten in etwa der Meshdichte bei Ende des adaptiven Laufes entspricht, kommt man bei Verwendung von Subgridding mit ca $\frac{1}{4}$ der Meshzellen aus (Abb. 8), die Rechenzeit liegt bei nur 2 min.

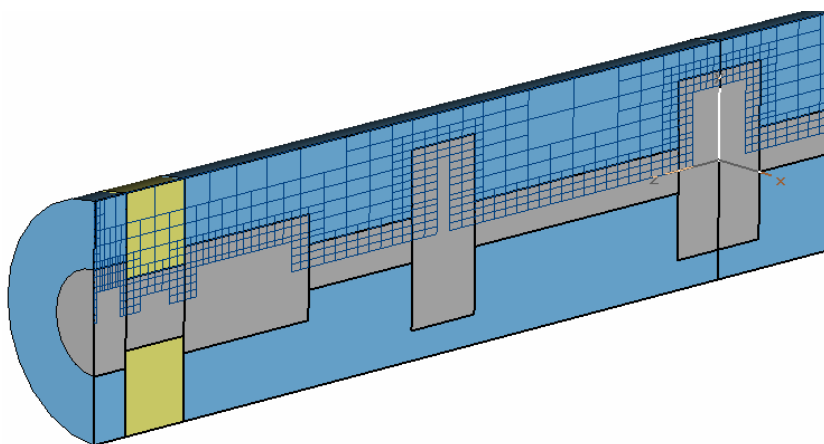


Abb. 8: Meshansicht für Subgridding, deutlich erkennbar die lokale Verfeinerung

Zusammenfassend zeigt sich dass die verschiedenen Methoden alle auf das gleiche Ergebnis führen, und eine sehr gute Übereinstimmung zur Messung zeigen (siehe Abb. 9-10).

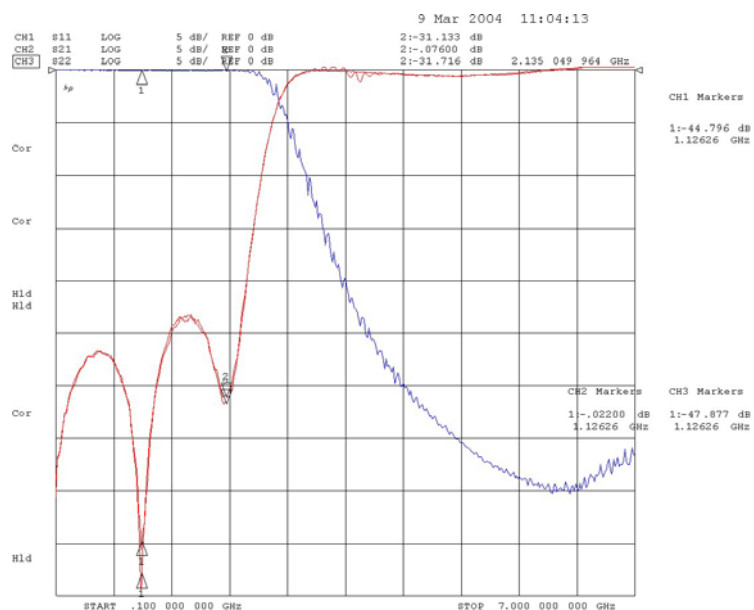


Abb. 9: Messergebnisse

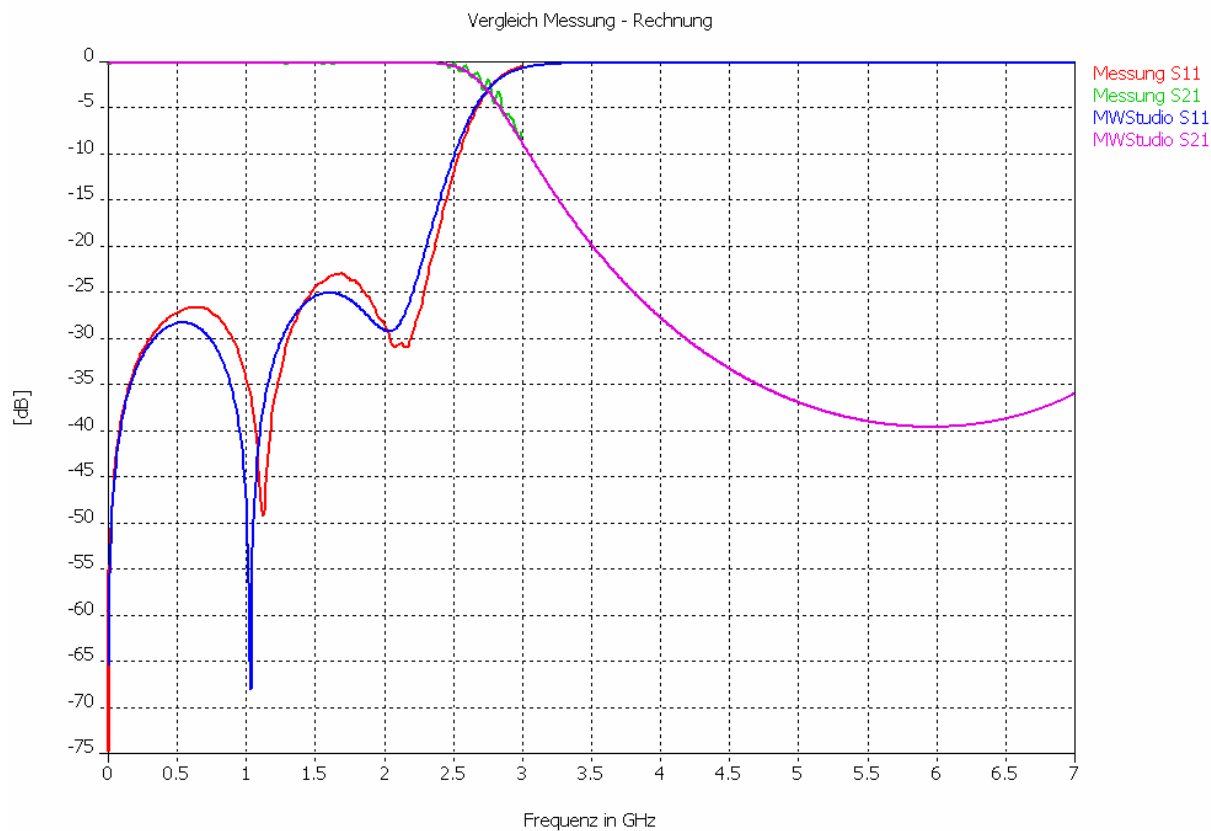


Abb. 10: Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Messung

Durch Unterteilung des Gesamtmodells lässt sich weitere Rechenzeit einsparen. Hierzu wird die Teilung mittig an zwei Stellen des dünnen Innenleiters durchgeführt. Wegen Längssymmetrie kann man sich auf eine Hälfte beschränken. Hier tritt nur der dominante TEM-Mode auf, eine Mitnahme höherer Moden ist daher nicht notwendig. Die Meshdichte wurde so eingestellt, dass Sie etwa der Dichte aus dem Modell mit 40 Linien/ λ entspricht. Die Rechenzeit für alle 3 Teilstücke betrug ca. 10 sec, was etwa 10% der Rechenzeit des Gesamtmodells entspricht. Ein weiterer wichtiger Vorteil bei Unterteilung des Modells liegt im Wegfall von 3D-Resonanzen, die eine transiente Rechnung verlängern können.

Der enorme Gewinn bei Verwendung von Teilmodellen in CST DS offenbart sich dann, wenn Optimierungen durchzuführen sind: Werden z.B. Geometrieparameter zur Optimierung verwendet, sind dazu CST MWS -Läufe notwendig zur Bestimmung der Teil-S-Parameter, die aber -wie erwähnt- schneller laufen als eine Optimierung am Gesamtmodell. Zum zweiten lassen sich in CST DS die erforderlichen S-Parameter für einen aufgespannten Parameterraum interpolieren, was einen enormen Rechenvorteil bringt. Für das einfache Tiefpassbeispiel liegt die Rechenzeit, bei acht freien Parametern zur Längen und Dickenvariation des Innenleiters, bei nur ca. 2 min.

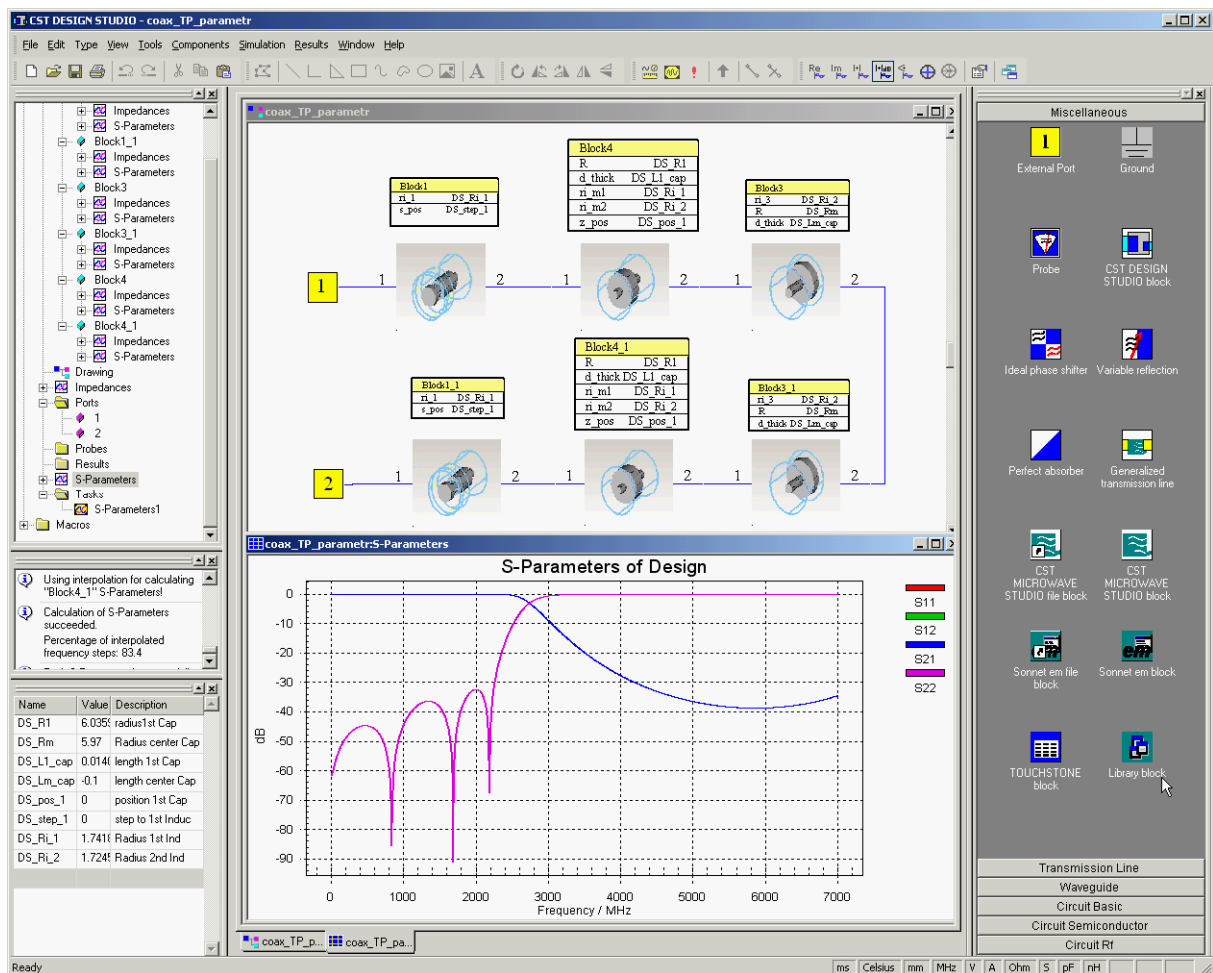


Abb.11: CST MWS Teilmodelle sind als Library-Elemente in CST DS definiert. Die verwendeten Optimierungsparameter werden direkt den Teilmodellen zugewiesen; die 3 Teilmodelle sind durch einfaches Kopieren zum Gesamtmodell ergänzt worden, Zielfunktion war $S_{11min} = 0 - 2400 \text{ MHz}$.

Nach nur 63 Auswertungen der Zielfunktion, von denen 18 komplette 3D-Simulationen und 45 Interpolationsschritte waren, sank die Zielfunktion vom Anfangswert 1,07 auf 0,014 ab. Diese wesentliche Verbesserung des Filterverhaltens wurde hauptsächlich durch eine ca. 15%-ige Zunahme des Durchmessers der induktiven Innenleiter erreicht.

TerraSAR-X Active Phased Array Antenne

Im zweiten Beispiel wird eine Phased-Array Antenne aus dem Project TerraSAR-X [6],[7], des Instituts DLR und der Firma EADS/Astrium simuliert und mit Messungen verglichen. TerraSAR-X besteht aus einem aktiven Phased-Array mit $32 \times 12 = 384$ Subarrays wie Abbildung 12 zeigt, wobei die Wellenleiterantenne aus einem vertikal und horizontal polarisiertem System besteht. Abbildung 13 zeigt die Antenne eines Panels bestehend aus 32 Subarrays.

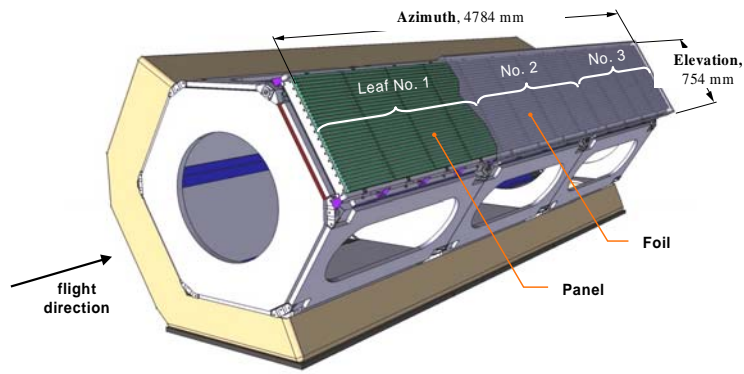


Abb. 12: TerraSAR-X Antenne mit Satellit

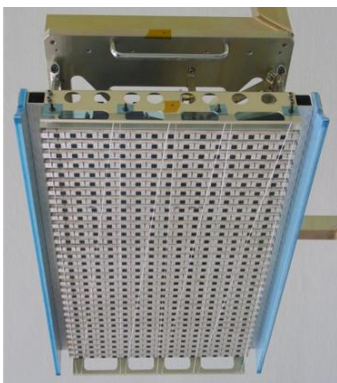


Abbildung 13: Photo eines Panels mit 32 Subarrays

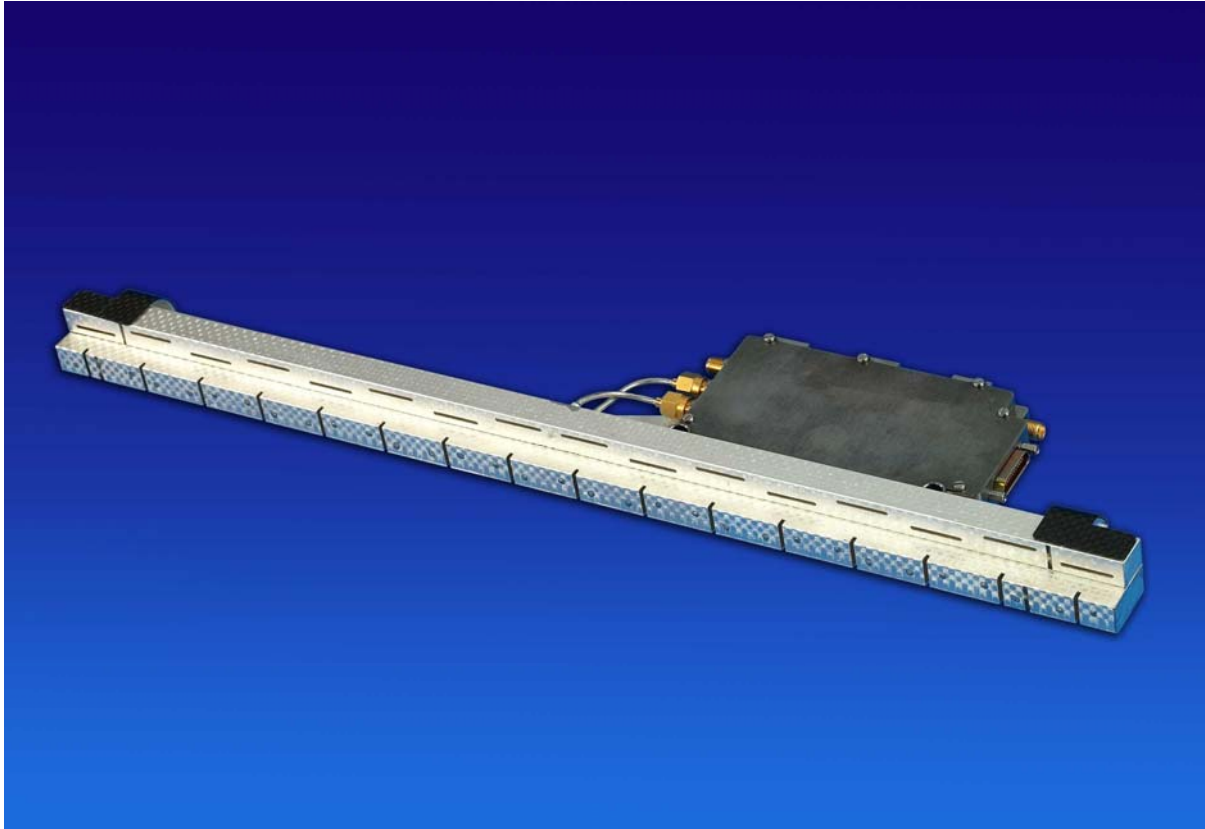


Abb. 14: Subarray mit T/R-Modul, die Querschlitzte erzeugen die horizontale Polarisierung (HP), die Längsschlitzte die vertikale Polarisierung (VP)



Abb. 15: Messaufbau für ein Subarray bestehend aus drei T/R-Modulen. Die Speisung erfolgte für vertikale Polarisierung.

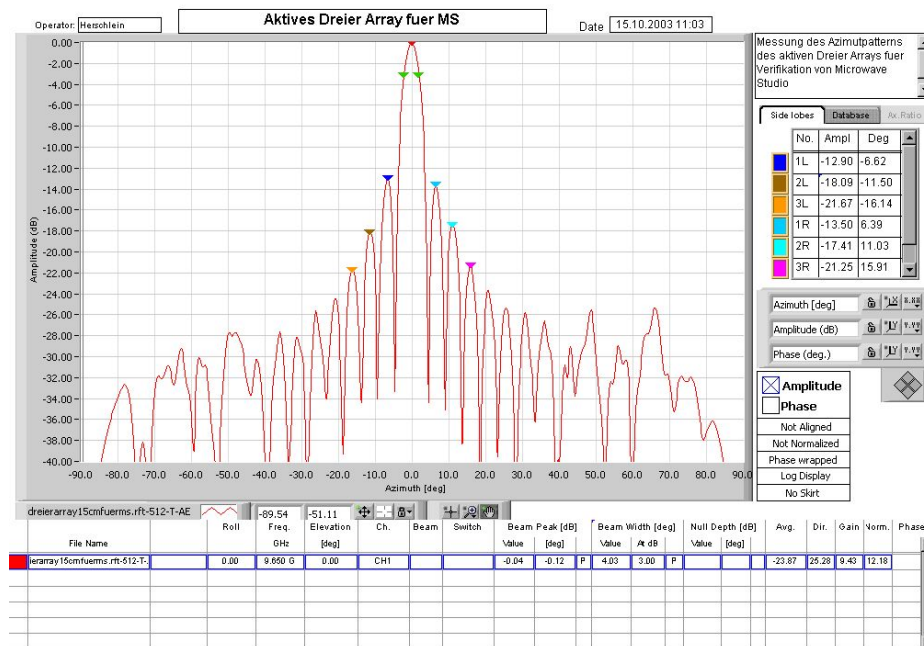


Abb.16: Messergebnis der Direktivität für azimuthale Richtung

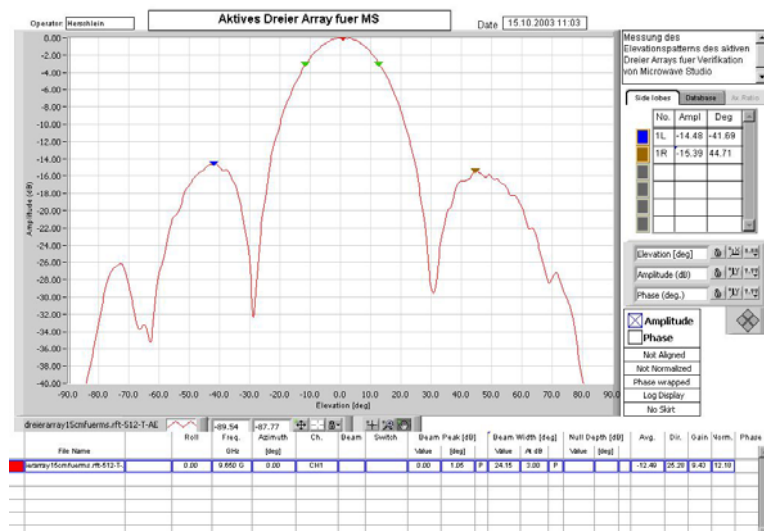


Abb.17: Messergebnis der Direktivität für Elevation

Zur Verifikation der Messung mit der Simulation wurden drei einzelne Subarrays wie in Abb. 14 gezeigt, zu einem kleinen Array zusammengebaut, zu sehen in Abb. 15. Seitlich sind Absorbermatten angebracht, darunter liegend Pyramidenabsorber. Die Messergebnisse sind bei vertikaler Polarisation (VP) in Abb. 16 und 17 für beide Hauptachsenrichtungen dargestellt.

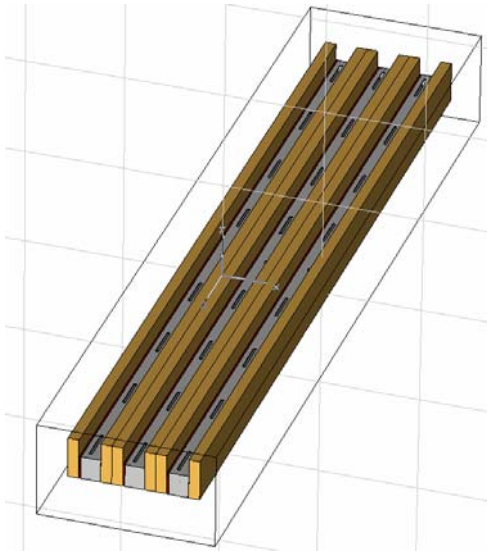


Abb. 18: CST MWS - Modell: Die Randbedingungen an den 6 Außenseiten sind als offene Ränder definiert.

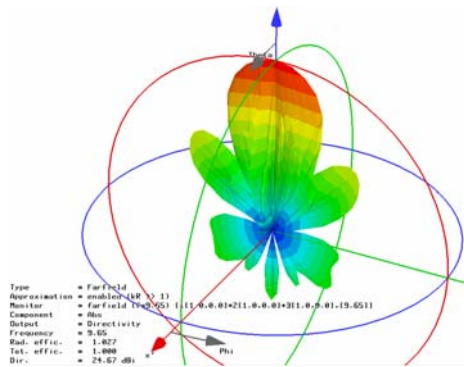


Abb. 19: 3D- Fernfeld für Direktivität bei simultaner, phasengleicher Speisung



Abb. 20: Vergleich Messung-Rechnung für den azimutalen Schnitt.

Der Aufbau des Simulationsmodells (Abb. 18) ist bis auf die Absorbermatten identisch zum Messaufbau und wird von offenen Rändern umschlossen. Die Einspeisung an den unteren coaxialen Ports erfolgt mit gleicher Amplitude und Phase = 0 Grad zwecks Übereinstimmung mit den Messbedingungen. Am 3D-Fernfeldplot lässt sich die maximale Direktivität mit 24.67 dBi ablesen; die Messung zeigte 25.28 dBi. Skaliert man einen 2D-Fernfeldschnitt auf denselben maximalen Betrag, kann man die Fernfelddaten direkt vergleichen. Die Richtung der Nebenkeulen stimmen sehr genau, der Betrag des ersten Nebenzipfels weicht etwas von der Messung ab (ca. 1 dBi bei -12dBi Level), bedingt durch die fehlende Absorbermatte.

Um den Einfluss der Arraygröße auf das Fernfeld flexibel untersuchen zu können, und um die Rechenzeit zu minimieren, kann auch nur ein einzelnes Element (Unit-Cell) zur Simulation verwendet werden, wobei durch Verwendung periodischer Randbedingungen der Einfluss der Nachbarelemente mitberücksichtigt wird. Der Phasenwinkel zwischen den beiden Perioden ist mit Null Grad definiert. Die Abbildung 22 gewährt einen Einblick in die koaxiale Einspeisestelle. Das errechnete Fernfeld gilt natürlich nur für den Einzelstrahler. Durch Überlagerung der Fernfelddaten im Postprocessing lassen sich aber beliebige Konfigurationen in Bezug auf Anzahl der Arrays, Amplitude und Phase der Einzelstrahler und geometrischer Versatz angeben. Die Einstellung zur Berechnung der Überlagerung ist in Abb. 22 dargestellt

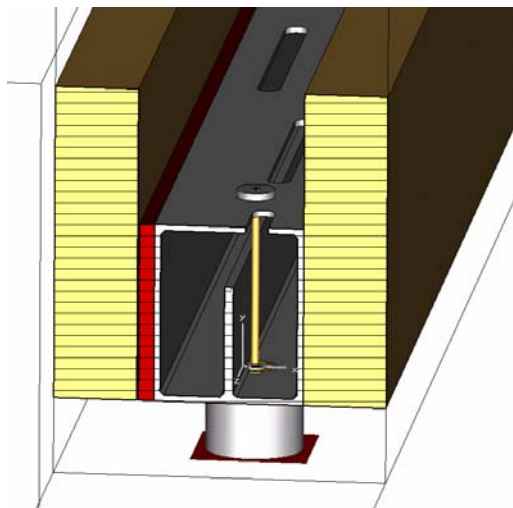


Abb.21: Schnittbild eines Einzelstrahlers. Seitlich sind periodisch Ränder mit Phase = 0 gesetzt, der Rest ist mit offenen Rändern belegt.

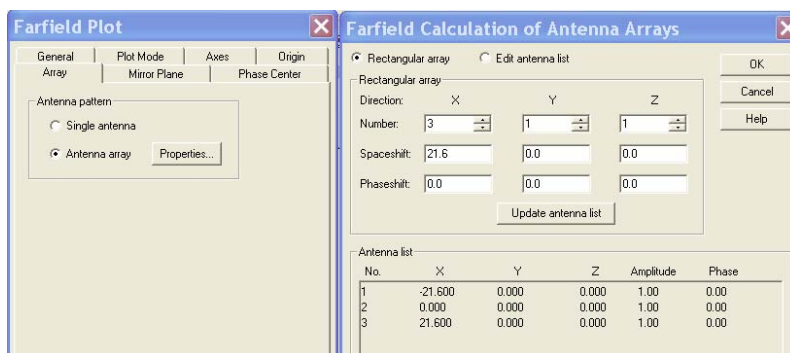


Abb. 22: Menü zur Überlagerung der Fernfelder: Gezeigt ist hier die Einstellung für das Array bestehend aus 3 Einzelarrays mit seitlichem Versatz und gleicher Phase = 0.

Das überlagerte Fernfeld stimmt mit der Messung im Bereich von ± 40 Grad sehr gut überein, wie aus Abb. 24 und 25 ersichtlich. Der Elevationsschnitt (quer zur Wellenleiterlängsachse) bringt bei der Messung leichte Unsymmetrie, wahrscheinlich bedingt durch die Unsymmetrie der seitlichen HP- Wellenleiter. Ebenso dürfte im Vergleich zur Simulation die Absorbermatte einen Einfluss im Bereich unter 40 Grad haben. Die Rückwärtskeule ist beim Modell bestehend aus 3 Einzelstrahlern ebenso größer, spielt aber beim Unit-Cell Modell nicht die Rolle, da die periodischen Ränder direkt an der Metallkante liegen und somit das Fernfeld in zwei Teile zerlegt ist.

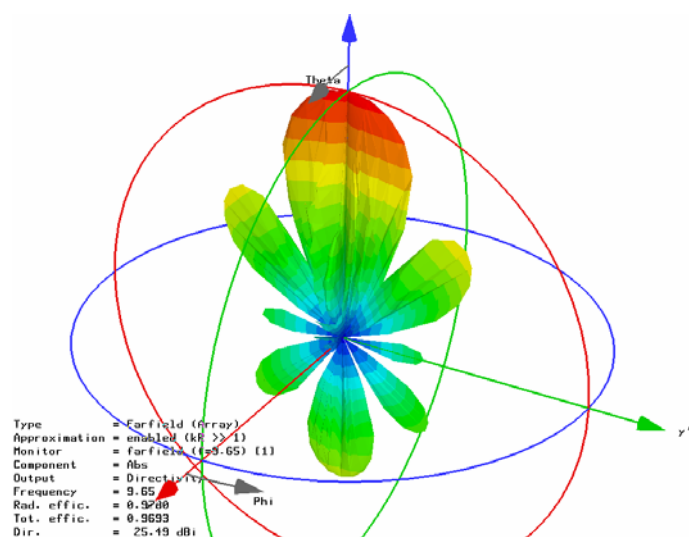


Abb. 23: 3D Fernfeld nach Überlagerung: Die max. Direktivität weicht nur ca. 0.2 dBi von der Messung ab.

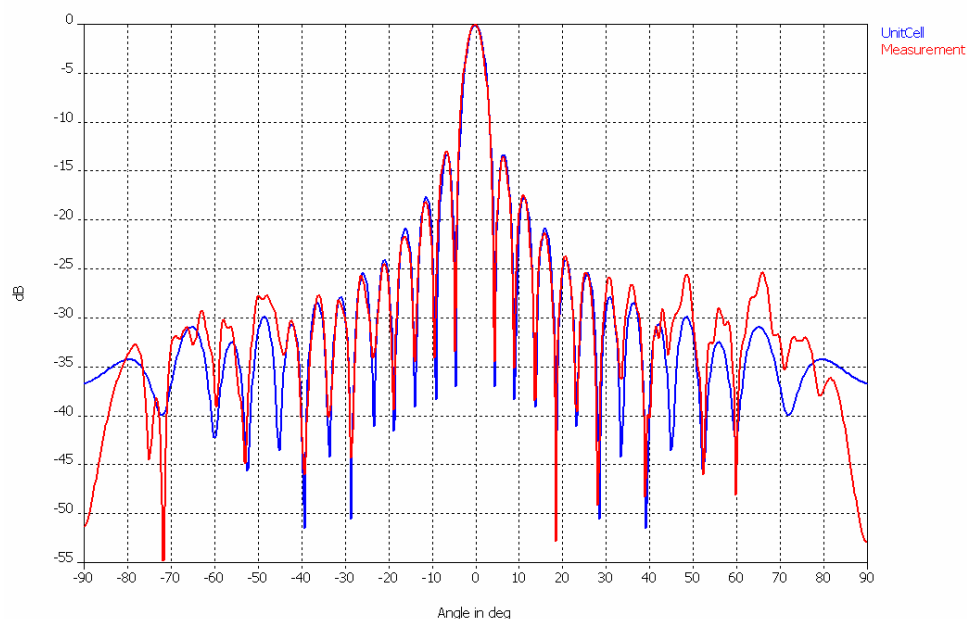


Abb. 24: Vergleich der Direktivität im Azimut-Schnitt. Im Bereich von ± 40 Grad ist die Übereinstimmung exzellent.

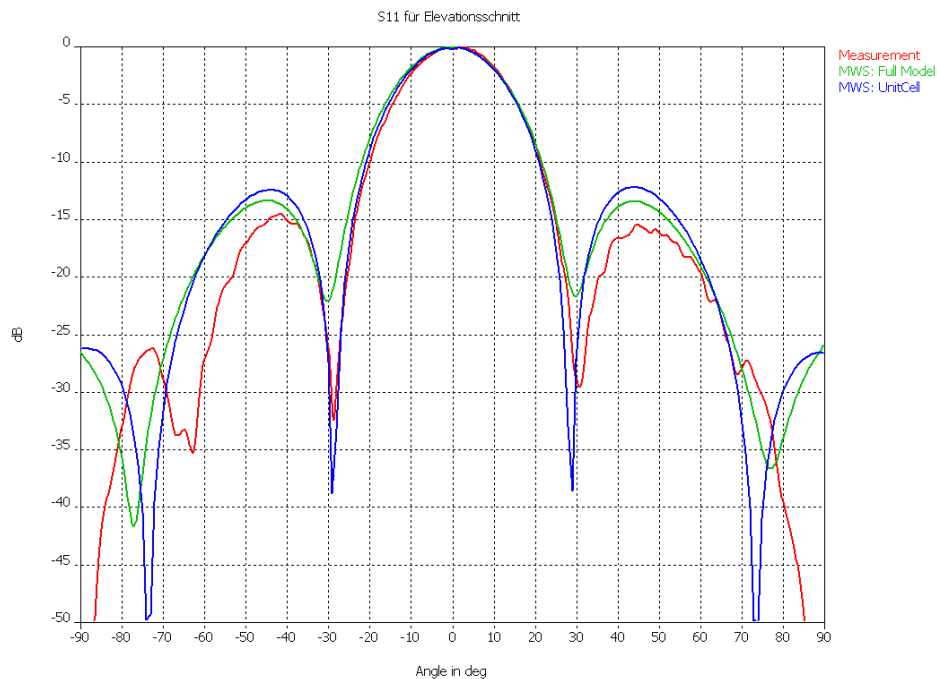


Abb. 25: Vergleich der Messung mit beiden Simulationsergebnissen im Elevationsschnitt.

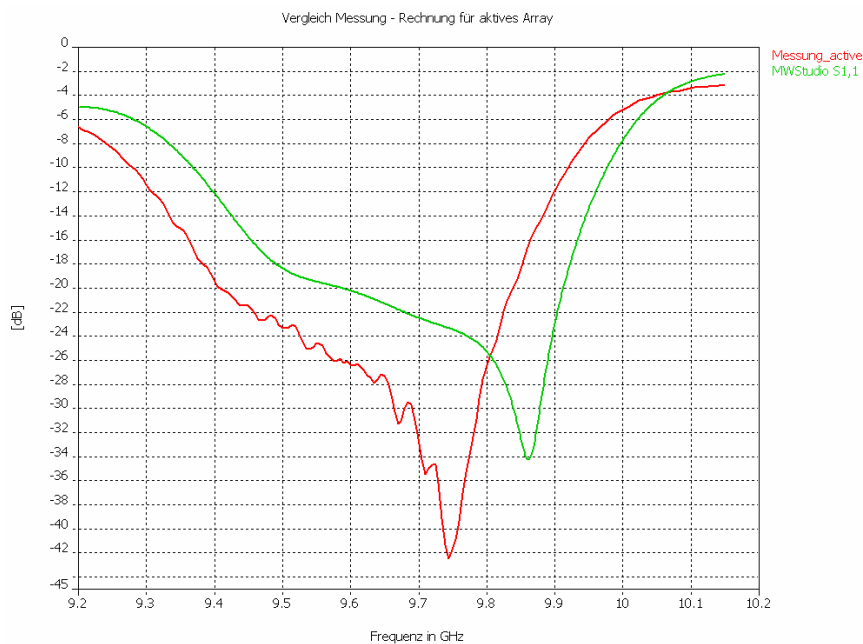


Abb. 26: Vergleich der S-Parameter des Einzelstrahlers (Unit-Cell) mit der Messung (aktive S-Parameter). Der Frequenzversatz beträgt hier rund 1% bezogen auf die Mittenfrequenz von 9.65 GHz.

Die periodischen Berandungen simulieren die Umgebung für ein unendlich ausgedehntes Antennenarray, so dass die gemessenen S-Parameter für ein, in der Anzahl der Arrays hinreichend hohes, aktives Array miteinander verglichen werden können. In Abb. 26 ist der Vergleich dargestellt. Die Kurvenform und Pegelhöhe stimmen, der Frequenzversatz weicht ca. 1% bezogen auf die Mittenfrequenz von 9.65 GHz ab. Die Rechenzeit für das Unit-Cell Modell (0.5 Millionen Zellen) betrug 1h 15 min (PC Xeon, 2.66GHz), für das Array aus 3

Antennenzeilen wegen der linearen Rechenzeitzunahme im Zeitbereich um ca. Faktor 3 länger.

Zusammenfassung:

Die Anforderungen an heutige 3D EM Simulationswerkzeuge sind neben leichter Bedienbarkeit, Interoperabilität, integrierter Optimierung insbesondere auch eine hohe Rechengeschwindigkeit ohne Kompromiss in Bezug auf die Genauigkeit der Ergebnisse. Aufgrund der schnell ansteigenden Rechnerleistung lassen sich heute wesentlich größere Strukturen berechnen als noch vor ein paar Jahren. Allerdings stiegen im gleichen Maße Rechenleistung und Anforderungen an die Komplexität und Größe der Modelle, die mit einer 3D EM Simulation berechnet werden sollen. Daher erfordern weitere Effizienzsteigerungen intelligente Algorithmen und Methoden, um komplexe Modelle ohne Verlust an Genauigkeit schneller zu designen und somit das „Time to Market“ zu verkürzen.

Die Methodenvielfalt von CST MICROWAVE STUDIO® und deren Einbettung in die Designumgebung CST DESIGN STUDIO™ erlaubt das effiziente Berechnen komplexer Probleme und das intelligente und automatische Aufteilen in schneller zu lösende Teilprobleme, wie anhand der hier vorgestellten Beispiele gezeigt wurde.

Den Firmen Kathrein-Austria KG und EADS/ASTRIUM GmbH vielen Dank für die zur Verfügung gestellten Modelle und Messungen.

*)

Franz Hirtenfelder,
Senior Application Engineer,
CST GmbH, 64289 Darmstadt

Literatur:

[1] T. Weiland: “A Discretization Method for the Solution of Maxwell’s Equations for Six-Component Fields”, Electronics and Communication 31, Seite 116, 1977

[2] K.S.Yee: ”Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell’s Equations in Isotropic Media”, IEEE Trans. On Antennas and Propagation, Band 14, Nr.3, Seite 302-307, 1966

[3] B. Krietenstein, R. Schumann, P. Thoma, T.Weiland: “The Perfect Boundary Approximation Technique Facing the big Challenge of High Precision Field Computation”, Proc. Of the Int. Linear Accelerator Conference, Chicago, USA, 1998, Seite 860-862

[4] CST MICROWAVE STUDIO®: Handbook “Advanced Topics”, Version 5, 2004

[5] CST DESIGN STUDIO™: “Getting Started and Tutorial”, Version 3, 2004

[6] M. Stangl, R. Werninghaus, R. Zahn: "The TerraSAR-X Active Phased Array Antenna",
Astrium GmbH, 88039 Friedrichshafen, DLR German Aerospace Center, 53227 Bonn

[7] A. Herrschlein, C. Fischer, H. Baumann, M. Stangl, W. Pitz, R. Werninghaus:
„Development and Measurement Results for TerraSAR-X Phased Array“, EADS Astrium
GmbH, 88039 Friedrichshafen, DLR, 53227 Bonn